

## 휘발성 유기물질의 효율적 열산화를 위한 사이클론 연소시스템 연구

현주수 · 이시훈 · 임영준 · 민병무

한국에너지기술연구원 청정에너지연구부

E-mail : hjs1261@kier.re.kr

### A Study on Cyclone Combustion System for Efficient Thermal Oxidation of VOC

Ju Soo Hyun, Si Hyun Lee, Young Jun Rhim and Byoung Moo Min

Clean Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research

#### 요 약

휘발성 유기물질은 도장공정, 염색, 건조공정 등 화학공정에서 발생하는 저발열량 가스이다. VOCs의 특징은 발열량이  $150 \text{ kcal/m}^3$  이하이며 착화를 위한 활성화 에너지가 높고 발생 에너지가 낮다는 것이다. 따라서 연소 안정성은 낮아지고 처리공정은 고에너지 소비공정이 된다. Cyclone 연소시스템은 연소기 내에 강한 선회 유동을 만들어서 에너지를 순환시켜 활성화에너지를 낮추어주고 열밀도가 높아 일반적인 swirl 연소 시스템에 비해 고온의 연소온도를 유지할 수 있으며 혼합성을 향상시킨다. 본 논문에서는 휘발성 유기물질의 열산화를 위해 최적의 cyclone 연소시스템을 개발하는 것을 목적으로 수행되었으며 특별히 설계된 연소기에서 연소온도와 배가스 조성에 미치는 swirl number의 영향을 정립하였다.

**Abstract** — Volatile organic compounds (VOCs) are low calorific value gases (LCVG) emitted from chemical processes such as painting booth, dye works and drying processes etc. Characteristics of VOCs are low calorific values less than  $150 \text{ kcal/m}^3$ , high activation energy for ignition and low energy output. These characteristics usually make combustion unstable and its treatment processes needs high-energy consumption. The cyclone combustion system is suitable for LCVG burning because it can recirculate energy through a high swirling flow to supply the activation energy for ignition, increases energy density to make a combustion temperature higher than usual swirl combustor and also increases mixing intensity. This research was conducted to develop optimized cyclone combustion system for thermal oxidation of VOCs. This research was executed to establish the effect of swirl number with respect to the combustion temperature and composition of exhausted gas in the specific combustor design.

#### 1. 서 론

본 논문은 중소 산업체에서 발생하는 휘발성 유기물질을 연소하는 열산화 시스템(recuperative thermal oxidation system)에 사이클론 연소기술을 적용하여 보조연료 사용량을 최소화하는 경제적인 열산화 시스템을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 기존 열산화 시스템의 열효율이 75%로 재생 열산화 시스템(regenerative thermal oxidation system)보다 낮아 운전비가 많이 소요되는 단점을 극복하기 위해 사이클론 연소기를 적용하

여 경제성을 향상시키고, 직접 열산화 처리가 가능한 VOC 농도 범위를 확대 시키는 것이 핵심이다.

휘발성 유기물질의 연소에서 가장 큰 문제는 이들 가스가 착화를 위한 활성화 에너지가 높고 energy output은 낮다는 것이다<sup>1)</sup>. 즉 착화가 어렵고 연소온도가 낮아 완전처리를 위해서는 많은 양의 보조연료가 필요하다는 것이다.

이러한 휘발성 유기물질의 열산화시에 보조연료의 소모량이 많다는 문제점을 해결하기 위한 방안으로는 연소에너지를 재순환하는 방법이 있다. 일반적으로 연소에

너지를 재순환시키는 방법은 두가지이다. 하나는 일반적인 방법으로 열회수 시스템인 열교환기를 운용하는 것이고 다른 하나는 연소기 내부에서 연소가스의 재순환(recycling of combustion generated heat)을 유도하여 이 고온의 연소가스가 유입되는 가스의 착화에 필요한 활성화 에너지를 공급하는 역할을 하게 하는 것이다. 연소실에서 연소열을 재순환 시키는 연소기술이 사이클론 연소기술이다. 사이클론 연소기는 1970년대에 Syred에 의해 개발되어<sup>[2]</sup> 1980년부터 미국의 TRW에서 발전소의 보일러에 적용하고 있는 기술이다.

사이클론 연소기는 연소기 내부에 접선방향으로 고속으로 유입되는 연소용 공기로 선회 유동장을 형성하게 된다<sup>[3]</sup>. 따라서 연소가스가 열에너지를 갖고 재순환하면서 저열량의 휘발성 유기물질의 유입구 위치에서 착화를 촉진시킨다. 이러한 재순환 효과로 착화가 어려운 휘발성 유기물질의 활성화 에너지를 낮출 수가 있으므로 보조연료 사용량을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 강한 선회 유동장이 형성되어 체류시간이 증가되는 효과가 있으며, 강한 난류 영역의 형성으로 연료와 공기의 혼합성이 향상되고, 열밀도의 증가로 동일한 입열량으로도 고온의 운전온도를 유지시킬 수 있는 효과가 있다. 즉 연소의 3대요소인 3T(time, temperature, turbulence)를 증가시키는 것이다. 사이클론 연소기는 저발열량 가스들, 발열량이  $1.3 \text{ MJ/m}^3 (300 \text{ kcal/m}^3)$  이하의 가스 연소(최근에는  $0.2 \text{ MJ/m}^3 (50 \text{ kcal/m}^3)$ )에 사용되고 있다<sup>[4]</sup>.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 사이클론 연소기

실험용 cyclone 연소시스템을 설치하였다. 용량은 자체 열량이  $50 \sim 200 \text{ kcal/m}^3$ 인 저열량 가스를 시간당 약  $150 \text{ Nm}^3$  처리 할 수 있는 규모이다. 설계를 위해 이론적인 열수지 계산을 수행하였으며, 적정 체류시간을 부여하기 위한 연소실 체적 계산 및 연소기 운전온도 유지에 요구되는 보조연료 사용량, 연소용 공기 공급량을 계산하였다. VOC 연소시스템의 scale-up이나 운전온도, 보조연료 소요량 등의 운전변수에 따른 연소성능의 예측이 가능하도록 하였다.

이론적인 열수지 계산에서 연소실 체적은  $0.096 \text{ m}^3$ 으로 계산되어지고 이를 토대로 cyclone 연소기의 내부 직경은  $35 \text{ cm}$ , 연소실 길이는  $100 \text{ cm}$ 로 설계되었다. 또한 연소온도를  $800^\circ\text{C}$ 로 유지하는데 필요한 LPG 소요량은 시간당 약  $2.93 \text{ kg/hr}$ 로 계산되었다. 이때 방열손실은 약  $5.6\%$ 이며 과잉공기비는  $4.25$ 로 계산되었다.

그리고 보조연료 버너가 연소실 상단에 축방향으로 설

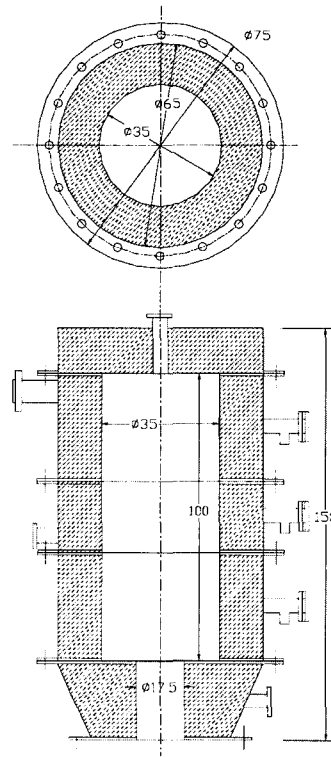


Fig. 1. Schematic representation of cyclonic VOC combustor and section design.

치되어 축방향으로 형성되는 보조연료 화염과 접선방향으로 선회 유동하는 VOC와의 혼합성이 약화되는 경향이 있으므로 보조연료 버너를 VOC 유입구와 같은 위치에서 접선방향으로 설치하여 보조연료 화염도 선회 유동을 하도록 설계하였다.

본 연소기는 실험용이므로 고온 및 저온 열부식 상태 확인 및 내부 수리, 청소 및 향후 연소실 부피 변화 실험등이 가능하도록 연소기를 3개 section으로 분리 가능한 구조로 설계하였다. 이상의 기본 계산 자료를 토대로 설계한 실험용 cyclone 연소기의 형태는 Fig. 1과 같다.

### 2-2. 실험 방법

Fig. 2에 시스템 계통도를 나타내었다. 연소용 공기는 F.D. Fan으로 공급되며 cyclone 연소기 하단에 설치된 예열기에서 약  $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 까지 예열된다. F.D. Fan과 예열기 사이에 전체 연소용 공기공급량 측정용 오리피스를 설치하였고, 보조연료 버너로 공급되는 1차공기는 LPG 분사용으로 압력 손실을 고려하여 air compressor에서 생성된 압축공기를 사용하였다. 압축공기의

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. VOC 농도 변화실험

Swirl number 6.0, 체류시간 0.65초, 톨루엔 처리량 2.45 Nm<sup>3</sup>/min 로 일정하게 유지하고 톨루엔 농도를 변화시킨 연소성능실험을 수행하였다. Table 1은 톨루엔 농도가 각각 2700 ppm(LEL 22.5%), 2000 ppm(LEL 16.7%), 1550 ppm(LEL 12.9%), 1000 ppm(LEL 8.3%), 380 ppm(LEL 3.2%)인 다섯가지 조건에서 실험 결과를 요약 정리한 것이다. Table 1에서 T<sub>c</sub>는 연소온도이며, HE는 열교환기에서 예열되어 연소기로 유입되는 톨루엔이 함유된 공기의 온도이다. Table 1에서 나타난 바와 같이, 톨루엔 농도가 2700 ppm, 2000 ppm 일 때는 LPG 사용량이 1.76 kg/hr로 줄어도 연소가 가능한 것으로 나타났고, 톨루엔 농도가 1550 ppm 일때는 LPG 사용량을 2.23 kg/hr 으로 늘려야 하며, 톨루엔 농도가 1000 ppm, 380 ppm으로 낮을 때는 LPG 사용량이 2.67 kg/hr 이상이어야 완전연소가 가능하다는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 보조연료로 LPG 사용량이 2.67 kg/hr 일 때 톨루엔 농도 변화시에 연소온도와 유입온도 그리고 CO 발생량의 변화를 나타낸 그림이다. LPG 사용량이 2.67 kg/hr에서는 톨루엔 농도가 380 ppm로 가장 낮아도 연소온도(T<sub>c</sub>)는 822°C를 유지하면서 CO 발생량이 14 ppm에 불과하였다. LPG 사용량이 2.23 kg/hr에서는 톨루엔 농도가 1550 ppm 일 때 연소온도(T<sub>c</sub>)가 785°C로 낮아도 CO 발생량이 10 ppm에 불과하였으나, 톨루엔 농도 1000 ppm 일 때는 연소온도(T<sub>c</sub>)가 820°C로 높았어도 CO 발생량이 23 ppm으로 증가하였다. LPG 사용량 1.76 kg/hr에서는 톨루엔 농도 2000 ppm 일 때는 연소온도(T<sub>c</sub>)가 785°C를 유지하면서 CO가 21 ppm 발생되는 것을 알 수 있다. 즉 보조연료 사용량을 줄임에 따라서 전체 투입열량의 감소에 따라 연소온도가 낮아져 톨루엔 가스의 연소성능이 저하된다. 본 연구에서는 CO 발생량이 50 ppm 이하 일 때 운전 가능한 연소온도로 규정하였으며, 따라서 자체 개발한 본 연소기에서는 톨루엔 농도 2000 ppm일 때 경제적인 운전온도는 785°C인 것으로 나타났다. 참고로 톨루엔의 이론적인 연소온도는 727°C이나 연

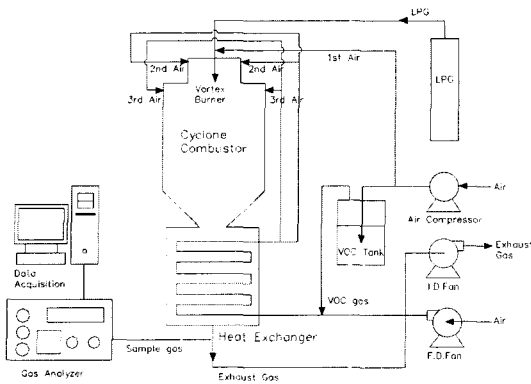


Fig. 2. Schematic process flow diagram of VOC combustion system.

일부는 VOC tank 내로 유입되어 VOC fume이 생성 되도록 하였다. VOC 농도 제어는 tank 온도와 압축 공기량으로 제어하였다. 생성된 VOC fume은 상온에서 전체공기 공급 라인에 연결되어 연소용 공기와 혼합된 후에 예열기로 유입하였다. Cyclone 연소기에서 연소된 약 800°C의 연소가스는 후단에 설치된 예열기를 통과 하면서 VOC가 함유된 연소용 공기를 예열 시킨 후 약 300°C 이하로 온도가 낮아져서 배출된다. 시스템 후단에는 I.D. Fan이 설치되어 연소실 내부에 압력을 제어 할 수 있도록 하였다. 연소실 내부 압력은 운전 중에 -5 mmAq에서 0 mmAq 범위로 약간의 부압이 걸리도록 하였다. 배출가스 라인에 샘플링 포트를 만들어 배기가스 조성(O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC)를 측정하였으며, cyclone 연소기 전후단에 차압계를 설치하여 압력손실을 측정하였다.

온도와 압력, 유량 측정 data는 computer에서 data acquisition을 하여 자동 기록 및 저장이 되도록 하였다. VOC는 톨루엔을 대상으로 사용하고, VOC 농도와 VOC 처리량을 주 실험변수로 하였다. 이때 측정항목으로는 연소실과 주변장치 각 부위의 온도, 연소실의 압력손실, 보조연료 소요량, 배출가스 농도 그리고 각 운전조건에서 FD fan과 ID fan의 소요동력을 측정하였다.

Table 1. Combustion results with toluene concentration and amounts auxiliary fuel.

VOC	2700 ppm (LEL22.5%)			2000 ppm (LEL16.7%)			1550 ppm (LEL12.9%)			1000 ppm (LEL8.3%)			380 ppm (LEL3.2%)		
	LPG (kg/hr)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)
2.67	807	569	5	804	561	0	798	570	6	844	663	2	822	629	14
2.23	799	601	4	794	586	0	785	581	10	820	653	23	795	607	107
1.76	786	622	7	785	595	21	759	582	119	785	631	190	-	-	-

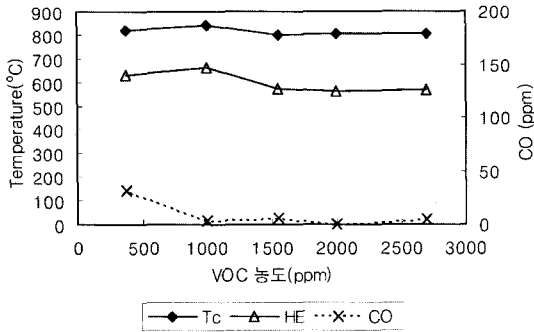


Fig. 3. Combustion results with toluene concentration (LPG : 2.67 kg/hr).

소기의 형태, 연료와 공기의 혼합성 및 체류시간에 따라 실제 현장에서는 900°C 이상의 연소온도로 운전되고 있다.

톨루엔 농도가 1550 ppm 이상인 경우에는 본 연소기의 연소실 운전온도 800°C 이상에서는 완전연소가 가능한 것으로 나타났고, 톨루엔 농도가 1000 ppm, 380 ppm 에서는 각각 840°C, 860°C 이상이 되어야 완전연소 되는 것으로 나타났다. 즉, 보조연료와 톨루엔 자체 발열량을 합한 전체 입열량은 같더라도 톨루엔 농도가 낮을 수록 높은 연소온도가 요구되는 것을 알 수 있었다.

3-2. 처리량 변화실험

본 연소시스템에서 최적의 처리용량을 규명하기 위하여 VOC 농도를 일정하게 유지하면서 처리량만 변화시킨 연소성능실험을 수행하였다. 가스 처리량을 변화시킬 경우 연소실 체적이 일정하므로 체류시간이 따라서 변화하게 된다. 가스 처리량이 3.15 Nm<sup>3</sup>/min, 2.45 Nm<sup>3</sup>/min, 1.95 Nm<sup>3</sup>/min 일 때 체류시간은 각각 0.5 sec, 0.65 sec, 0.8 sec이다. 이때 유입속도는 각각 약 20 m/sec, 15 m/sec, 12 m/sec이다. LPG 사용량은 2.67 kg/hr에서 2.23 kg/hr, 1.76 kg/hr로 줄이면서 연소온도와 CO 발생량등의 연소성능 변화를 측정할 결과이다. Table 2는 각 처

리량 조건에서의 실험 결과를 요약 정리한 것이다.

가스 처리량이 3.15 Nm<sup>3</sup>/min 일 때는 LPG 사용량을 1.76 kg/hr로 줄이면 CO 발생량이 68 ppm으로 높아지는 현상을 보였으나 처리량이 2.45 Nm<sup>3</sup>/min일 때는 LPG 사용량 1.76 kg/hr에서 CO 발생량이 21 ppm으로 안정된 연소가 이루어졌고, 처리량이 1.95 Nm<sup>3</sup>/min 일 때는 LPG 사용량을 1.47 kg/hr까지 줄일 경우에도 CO 발생량이 18 ppm인 것으로 나타났다. 즉 처리량이 감소할수록 체류시간이 길어지므로 연소성능이 향상되며, 처리량 증가시에는 단위시간에 처리할 수 있는 가스 처리량이 증가하는 효과는 있으나 체류시간 감소로 인해 연소성능이 저하되었기 때문이다. 또한 체류시간이 0.5초인 처리량 3.15 Nm<sup>3</sup>/min 일 경우에는 Fan 동력비도 약 70%가 더 소요되므로 비효율적인 것으로 판단되었다.

3-3. 연소실 내부온도분포 측정

선회 유동장 형성으로 원형의 화염부 형성에 따른 연소실 내부의 온도분포 특성을 알아보기 위해 연소실 내부 16개 위치의 온도를 측정하였다. 측정위치는 연소기 section 2, 3, 4의 로중심부 온도 측정을 위해 설치된 온도 보정한 C1, C2, C3 3개의 K type thermocouple를 로중심부에서 로벽까지 4 cm 간격으로 이동시키면서 5개 위치(로벽에서 1 cm, 5 cm, 9 cm, 13 cm, 17 cm 지점)의 연소온도를 측정하였다. 그리고 연소기 section 5에 설치된 C4는 연소기 배출구에 설치된 K type thermocouple 이므로 배출구 중심부에 고정시킨 온도를 측정하였다. 연소실 반경은 r=17.5 cm 이므로 각 측정위치는 0.1r, 0.3r, 0.5r, 0.7r, 1.0r에 해당된다.

가스 처리량은 2.45 Nm<sup>3</sup>/min, 톨루엔 농도는 2000 ppm(LEL 16.7%), LPG 공급량은 2.23 kg/hr로 일정하게 유지시켰다. 이때 Swirl number는 6.0이며 체류시간은 약 0.65초이다. 톨루엔의 자체 발열량은 농도 2000 ppm 일 때 78 kcal/m<sup>3</sup>이다.

Table 3은 실험 결과를 나타낸 것으로, avg.Tv는 각 측정 위치에서 C1, C2, C3의 온도 평균치로서 연소실

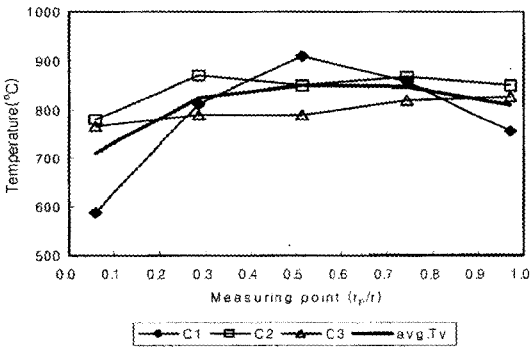
Table 2. Combustion results with gas flow rate and auxiliary fuel.

LPG (kg/hr)	Qe	3.15 Nm <sup>3</sup> /min			2.45 Nm <sup>3</sup> /min			1.95 Nm <sup>3</sup> /min		
		T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)	T <sub>c</sub> (°C)	HE (°C)	CO (ppm)
2.67		843	638	0	839	561	0	834	628	0
2.23		823	643	3	816	586	0	818	649	1
1.76		760	610	68	785	595	21	788	651	6
1.47		-	-	-	759	596	103	766	653	18
Residence time		0.5 sec			0.65 sec			0.8 sec		
Fan energy		1.398 kWh			0.827 kWh			0.494 kWh		

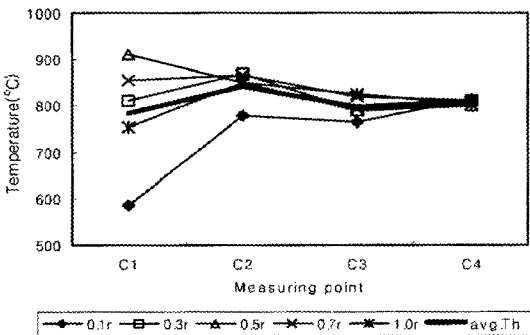
**Table 3. Combustion temperature distribution.**

Measuring point (rp/r)	HE (°C)	Combustion temperature (°C)				avg.Tv (°C)	ΔTv (°C)
		C1	C2	C3	C4		
0.1r	652	587	779	766	814	711	193
0.3r	665	813	870	791	811	825	79
0.5r	634	911	850	791	802	851	120
0.7r	675	858	867	821	813	849	47
1.0r	623	754	851	827	805	810	97
avg.Th (°C)		785	843	799	809	809	
ΔTh (°C)		324	91	61			

상단과 하단의 온도 평균값을 의미하며 ΔTv는 길이방향으로 최고온도와 최저온도의 차이를 의미한다. avg.Th는 C1, C2, C3 지점에서 로벽에서 0.1r, 0.3r, 0.5r, 0.7r, 1.0r 위치에서 측정된 온도의 평균치로서 로벽과 로중심부의 온도 평균값을 의미한다. ΔTh는 직경방향으로 최고온도와 최저온도의 차이이다. Fig. 4는 연소실 반경을 변수로 했을 때 각 section에서의 온도분포를 나타낸 것



**Fig. 4. Temperature distribution on the horizontal direction at each section.**



**Fig. 5. Temperature distribution on the vertical direction at each measuring point.**

이며, Fig. 5는 연소실 길이 즉 각 section을 변수로 했을 때 로벽에서 중심부까지 4 cm 간격으로 온도분포를 나타낸 것이다.

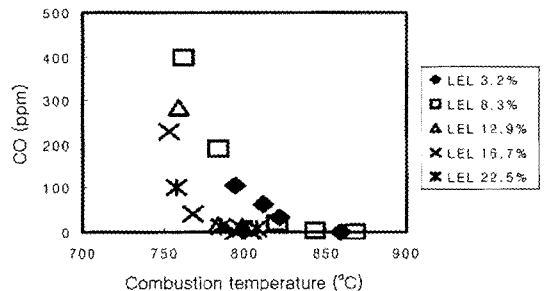
연소실 상단인 C1에서는 최고온도가 로벽에서 9 cm 지점(0.5r)에서 911°C를 기록하여 보조연료 화염이 선회 형태로 로벽과 로중심의 중간부위에 형성되는 것을 알 수 있다. 연소실 중간위치인 C2는 약 850~870°C 범위로 일정한 분포를 보이니 로벽 1 cm 지점(0.1r)에서만 779°C로 낮았다. 연소실 하단인 C3 온도는 로벽 1 cm 지점(0.1r)에서 766°C에서 로중심으로 갈수록 827°C까지 높아지는 경향을 보였다. C1, C2, C3의 평균온도인 avg.Tv를 보면 로벽 1 cm 지점(0.1r)에서의 온도가 711°C로 가장 낮고 로벽 9 cm 지점(0.5r)에서 851°C로 가장 높았다가 로중심(1.0r)에서는 810°C로 다시 낮아지는 결과를 보였다. 또한 톨루엔 연소는 연소실 중간부위인 C2 위치에서 주로 이루어짐을 알 수 있다.

연소실 상단(C1)에서는 온도변화폭이 크고 연소실 중단(C2)과 연소실 하단(C3)으로 갈수록 일정한 온도구배를 보였다.

**3.4. 연소온도 분석**

Cyclone 연소기에서 경제적인 최적의 운전조건을 도출하기 위하여 톨루엔을 대상으로 하여 일정한 농도에서 보조연료의 사용량을 감소시키면서 연소성능 실험을 수행하였다. 이때 전체 투입열량의 감소로 인해 연소온도가 저하됨에 따라 갑자기 CO 발생량이 급증하게 되는 운전 한계온도를 알 수 있다.

Fig. 6은 톨루엔 농도가 각각 380 ppm(LEL 3.2%), 1000 ppm(LEL 8.3%), 1550 ppm(LEL 12.9%), 2000 ppm(LEL 16.7%), 2700 ppm(LEL 22.5%)인 연소성능 실험에서 보조연료 사용량을 변화시킬 때 각각의 연소온도에서 발생된 CO 발생량을 비교한 것이다. 연소온도가 낮아질수록 CO 발생량이 증가하는 경향이 뚜렷하며, 연소온도 800°C를 기준으로 하여 그 이하가 되면 CO



**Fig. 6. Optimum combustion temperature limits at each toluene concentration.**

발생량이 급증하는 현상을 보였다. 그리고 CO 발생량이 급증하게 되는 연소온도는 톨루엔 농도에 따라 차이를 나타내었다. 즉 톨루엔 농도가 높을수록 운전한계온도가 낮아졌다.

#### 4. 결 론

Cyclone 연소기술을 적용한 휘발성 유기물질의 열산화 시스템을 개발하였다. 톨루엔을 대상으로 연소성능 실험을 수행하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) VOC 농도 변화실험에서, 저농도 가스일수록 연소온도가 높아야 완전연소가 가능하며, 일반적으로 촉매 소각이나 재생 열산화 방법이 사용되는 LEL 10% 이하의 저농도 VOC 가스도 본 사이클론 연소기에서 직접 열산화 처리가 가능함을 확인하였다.

2) 톨루엔 처리량을 변화시켜 체류시간이 0.8 sec에서 0.65 sec, 0.5 sec로 짧아져도 동일한 보조연료 사용량으로 연소시킬 수 있는 가스 처리량이 증가하는 효과가 있으나, Fan Energy가 더 소요되는 단점이 있었다. 실험 결과 체류시간이 0.65 sec인 톨루엔 처리량 2.45 Nm<sup>3</sup>/min 일때 가장 효율적인 운전이 가능하였다.

3) 연소실 내부온도 분포실험에서, 로벽과 로중심부의 온도차이는 평균적으로 약 100°C 내외로 로중심부의 온

도가 높은 분포를 보이나 보조연료 화염이 형성되고 톨루엔이 유입되는 연소실 상단으로 갈수록 온도차이가 크며, 선화유동장 형성으로 인해 최고온도는 로벽에서 9 cm (0.5r)지점에서 측정되었다.

4) 선회도와 혼합성 향상으로 약 800°C인 연소온도에서 운전이 가능했으며, 이때 톨루엔의 농도 증가로 자체 발열량이 높아질수록 운전온도를 낮출 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Chomiak, J., Longwell, J.P. and Sarofim, A.F.: "Combustion of Low Calorific Value Gases; Problems and Prospects", Prog. Energy Combust. Sci., 15, 109 (1989).
2. Syred, N. and Beer, J.M.: "Combustion in Swirling Flows: A Review", Combust. Flame, 23, 143 (1974).
3. Syred, N., Fick, W., O'Doherty, T. and Griffiths, A.J.: "The Effect of the Precessing Vortex Core on Combustion in a Swirl Burner", Combustion Science & Technology, 125, 139 (1997).
4. Syred, N., Mirzae, H. and O'Doherty, T.: "Low-temperature Natural Gas Fired Combustors and NO<sub>x</sub> Formation", Proc. Instn Mech. Engrs, 213 (Part A), 181 (1999).